

## Lade의 3차원 파괴규준을 이용한 현무암의 전단강도 산정

### Estimation to Shear Strength of Basalt using Lade's Three-dimensional Failure Criterion

남 정 만<sup>1</sup>                      Nam, Jung-Man  
윤 중 만<sup>2\*</sup>                     Yun, Jung-Mann  
송 영 석<sup>3</sup>                      Song, Young-Suk

#### ABSTRACT

In this study, a series of triaxial tests to Jeju basalt were carried out and then shear strength parameters of rock were estimated by the Lade's three-dimensional failure criterion. Also, the characteristics of shear strength parameters and failure plane which were estimated by the three-dimensional failure criterion were analyzed and this failure criterion was compared with the Mohr-Coulomb failure criterion. The variables of  $\eta_1$  and  $m$  are derived from the relationship between  $(I_1^3/I_3 - 27)$  and  $(P_a/I_1)$  during the failure period using the Lade's three-dimensional failure criterion. The failure plane size of Tracy-basalt has the largest plane and that of Scoria has the smallest plane among other octahedral planes which is the three-dimensional failure plane. Also, the failure plane of Tracy-basalt is formed as a triangle and that of Scoria is formed as a circle among other octahedral planes. As the result of comparison with the triaxial test results and the Lade's failure envelope and the Mohr-Coulomb failure envelope, the Lade's failure envelope matched up under higher stress, while the Mohr-Coulomb failure envelope matched up under lower stress. Also, the Lade's three-dimensional failure plane is larger than the Mohr-Coulomb three-dimensional failure plane. It means that the shear strength parameters estimated by the Lade's failure criterion is larger than that of the Mohr-Coulomb failure criterion.

#### 요 지

본 연구에서는 제주도 현무암에 대한 삼축압축시험을 실시하고 Lade(1977)의 3차원 파괴규준을 적용하여 강도정수를 산정하였다. 그리고 3차원 파괴규준에 의해 산정된 강도정수와 파괴면의 특성을 살펴보고, Mohr-Coulomb의 파괴규준으로 산정한 전단강도정수와 비교검토했다. 삼축압축시험결과를 토대로 Lade(1977)의 3차원 파괴규준을 이용하여 파괴시의  $(I_1^3/I_3 - 27)$  과  $(P_a/I_1)$  관계로부터 매개변수인  $\eta_1$  및  $m$ 을 구하였다. 3차원 파괴면을 나타내는 정팔면체 평면에서 조면암질 현무암의 파괴면이 가장 크고 스크리아가 가장 작으며, 단면형상은 조면암질 현무암이 가장 삼각형에 가깝고 스크리아가 가장 원형에 가까운 것으로 나타났다. 정팔면체 평면에서 삼축실험결과와 Lade의 파괴포락선 및 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 비교한 결과 높은 응력하에서는 Lade의 파괴규준이 실험치와 일치하며, 낮은 응력하에서는 Mohr-Coulomb의 파괴규준이 실험치와 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 Lade의 3차원 파괴면은 Mohr-Coulomb의 3차원 파괴면보다 크며, 이는 Lade의 파괴규준으로 산정된 전단강도정수가 Mohr-Coulomb의 파괴규준으로 구한 것 보다 더 크게 산정됨을 의미한다.

**Keywords** : Shear strength, Triaxial compression test, Lade's three-dimensional failure criterion, Failure envelope, Octahedral plane

1 정회원, 제주대학교 해양과학기술대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Department of Civil Engineering, Cheju National University)  
2\* 정회원, 안산공과대학 건설정보시스템과 부교수 (Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ansan College of Technology, E-mail : jmyun@act.ac.kr)  
3 정회원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

# 1. 서론

제주도는 현무암과 같은 특수한 지질학적 조건을 가지고 있으므로 토목 및 건축공사 수행시 수많은 시행착오를 겪고 있다. 즉, 제주도에 주로 분포하고 있는 화산암인 현무암에 대한 역학적 특성에 대한 다양한 조사결과가 요구되고 있다. 최근 들어 제주도 현무암의 공학적 특성에 대한 연구(엄관용, 2002; 남정만 등, 2008a)와 제주도 현무암의 강도특성과 파괴기준에 대한 연구가 수행된 바 있다(남정만 등, 2008b).

지반의 거동해석시에는 그 지반의 응력-변형 특성과 파괴시 응력상태를 정확하게 파악할 필요가 있다. 왜냐하면 파괴강도는 구조물의 안정성을 지배하는 가장 큰 요소가 된다. 일반적으로 지반속의 한 요소는 3차원 응력상태에 놓여있게 되므로 파괴역시 3차원 응력하에서 취급되어야 할 것이다. 이러한 파괴강도를 정확하게 산정하기 위하여는 지반속의 요소에 작용하는 3차원의 응력이 어떤 상태에 도달하여야 파괴가 발생하는가에 대한 정확한 판정의 기준이 필요하게 된다. 이러한 판정기준을 파괴기준(failure criterion)이라고 한다.

본 논문에서는 기존 파괴기준 중에서 암석에 적용할 수 있는 Lade(1977)의 파괴기준을 이용하여 제주도 현무암에 대한 3차원 파괴기준을 알아보려고 한다. 이를 위하여 서귀포시 성산을 일대에 대한 시추를 실시하여 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아 시료를 채취하였다. 이와 같이 채취된 시료를 대상으로 일련의 삼축압축시험을 실시하였다. 시험결과를 토대로 Lade의 3차원 파괴기준을 적용하여 강도정수를 산정하고 이를 Mohr-Coulomb의 파괴기준으로 산정한 강도정수와 비교분석하고자 한다.

## 2. 대상지역 및 지질

그림 1은 본 연구에서 이용된 제주도 현무암의 시료채취위치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시료채취지역은 제주특별자치도 서귀포시 성산을 일원에 위치하고 있으며 해발표고는 90.21m이다. 해안과의 직선거리는 약 3.4km 정도이며, 북동쪽에 독자봉(EI. 159.3m)과 통오름이 말발굽 형태로 발달되어 있다. 특히 연구지역 바로 북쪽에 미천굴이 용암동굴 형태로 분포하고 있다.

그림 2는 시료채취지역에 대한 지질도를 나타낸 것이

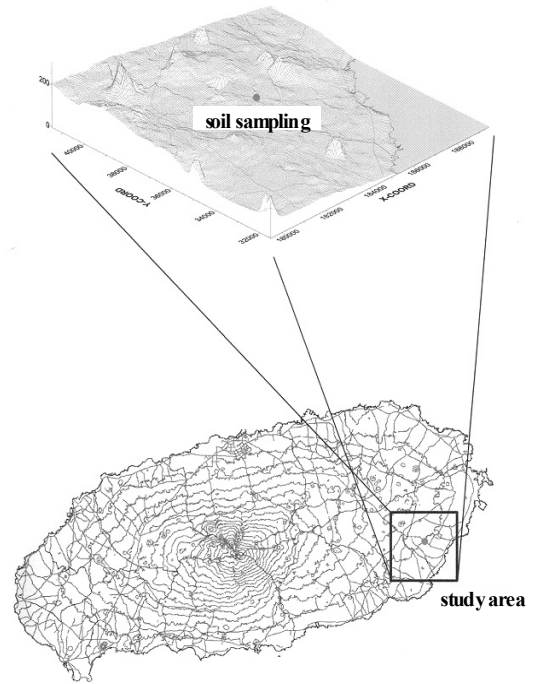


그림 1. 연구대상지역의 위치 (남정만 등, 2008a).

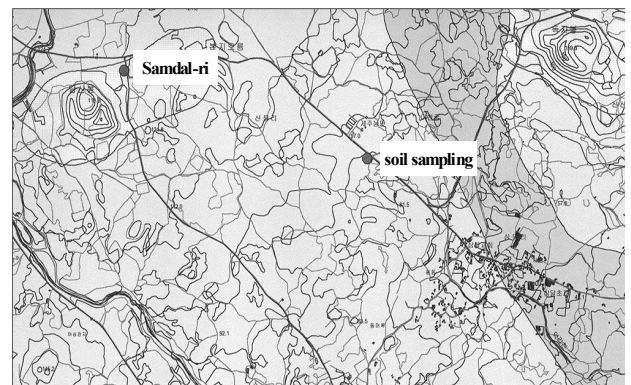


그림 2. 대상지역의 지질도(남정만 등, 2008a).

다. 시료채취지역의 지질은 밑에서부터 반상휘석현무암과 장석현무암류가 분포하고 있으며, 이들 상부에 침상장석감람석현무암이 대부분 피복되어있는 것으로 나타나고 있다.

시료채취지역의 대부분을 피복하고 있는 침상장석감람석현무암(Acicular Feldspar Olivine Basalt ; FOB)은 일명 표선리 현무암으로 불리워지며 회색 내지 암회색의 다공질 또는 치밀질의 평탄한 대지상의 용암대지를 형성하고 있다. 이 암석은 감람석을 반정으로 함유하고 침상의 장석이 특징적이며 제주도 동부 및 서부지역에 광범위하게 분포하나 남부지역과 북부지역 그리고 중상간 이상의 지역에서는 후기에 분출한 암석에 피복되어 지표노출이 확인되지 않는다. 또한 본 암은 분출 및 고화될 시 점성이 낮아 파호이호이 용암류의 산상을 보이며 이들 용암류의 유로

를 따라 다수의 용암동굴이 형성되었다. 침상장석감람석 현무암은 방사성동위원소(K/Ar) 연대측정 결과, 서귀포층의 퇴적시기부터 퇴적이 완료된 이후까지의 시기에 걸쳐 나타나며 대부분 서귀포층 퇴적 이후에 분출된 것으로 해석하고 있다.

시료채취지점에는 지표에서부터 GL(-)24m까지 치밀한 암회색의 침상장석감람석현무암이 분포하고 있다. GL(-)24~81m 구간은 매우 치밀한 조면암질 현무암이 분포하고 있으며 홍갈색의 스크리아층이 2~3매 협재되어 있다. GL(-)81~91m 구간은 홍갈색의 다공질 화산쇄설층이 분포하는데 화산쇄설물 중 소립자를 많이 포함한 채 용암이 굳은 상태이다. GL(-)91~157m 구간은 다공질의 침상장석감람석현무암이 분포하는데 하부로 갈수록 치밀해지는 경향을 보인다.

### 3. 시료채취 및 시험방법

#### 3.1 시료채취 및 공시체 제작

본 연구에서는 방향성을 잃지 않고 교란 및 훼손을 최소로 한 시료를 얻고자 하였으며, 오차를 최소로 하기 위하여 시료채취깊이를 표시하여 동일시험에는 1m 내의 동일 깊이의 시료를 사용하였다. 전술한 바와 같이 시료채취지역에는 표선리 현무암, 조면암질 현무암, 비현정질 현무암, 감람석 현무암, 서귀포층, U층 등이 분포하고 있다.

채취된 암석시료는 diamond thin-wall bit의 탈착이 가능한 코어링 기계를 이용하여 BX크기로 제작하였다. 본 연구에 사용된 암석시편으로서 공시체의 직경은 43mm, 높이는 86mm로 제작하였다. 그림 3은 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아에 대한 공시체를 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 표선리 현무암의 경우

다공질이며, 조면암질 현무암의 경우 조직이 치밀함을 알 수 있다.

#### 3.2 삼축압축시험

본 연구에서는 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스크리아에 대한 삼축압축시험을 실시하여 3차원 파괴규준에 적용하고자 한다. 암반에 설치되는 각종 구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 암반의 역학적 특성을 파악하는 것이 필수적이다. 가장 중요한 것은 실제 지반에서의 거동과 유사하게 암반 내 응력-변형률 상태를 모사하여 평가하는 것이다. 높은 응력조건 하에 있는 암석의 거동이나 그에 따른 지압현상 또는 단층이나 습곡 등의 지질구조에 관계되는 각종 현상을 설명하기 위해서는 삼축압축시험이 가장 효과적인 것으로 판단된다. 삼축압축시험은 반무한체 지반내의 한 요소는 축대칭상태에 있어 수평방향응력이 연직축을 중심으로 어느 방향으로나 동일하다는 점을 감안하여 실내에서 재현시킨 시험이다. 즉, 삼축상태의 응력을 고려하되 중간주응력과 최소주응력을 동일하게 하여 실시하는 것이다. 일반적으로 암반 내에는 삼축의 주응력이 모두 압축응력인 것이 보통이다. 삼축압축시험은 이와 같은 응력상태를 인공적으로 조절하면서 그때의 암석 거동을 관측할 수 있다.

특히 삼축압축시험은 보다 정확한 지반정수를 산정할 경우 실시된다. 삼축압축시험에서는 먼저 정수압을 구속압(또는 봉압, confining pressure)으로서 원통형의 암석공시체 표면에 작용시키고, 그 이후에 암석의 파괴가 일어날 때까지 공시체에 축방향 하중을 가함으로써 암석의 강도를 측정하는 것이다. 각각 다른 구속압 상태에서 일련의 시험을 실시하고, 시험결과에 대하여 각종 파괴기준을 적용함으로써 점착력 및 내부마찰각과 같은 강도정수를 구



(a) 표선리 현무암

(b) 조면암질 현무암

(c) 스크리아

그림 3. 암석종류별 공시체

할 수 있다. 삼축압축시험으로 얻어지는 축압조건과 이에 대한 삼축압축시험 결과는 일축압축강도 및 인장강도 측정결과 함께 암석의 중요한 역학적 특성인 점착력과 내부 마찰각을 구하는데 이용된다.

공시체의 직경은 43mm, 높이는 86mm로서 BX 크기를 사용하였으며, 직경에 대한 높이의 비는 2.0으로 하였다. 삼축압축시험시 축변형은 측정하지 않았으며, 삼축셀 내의 봉압력은 각각 5, 10, 20 MPa를 사용하였고, 기타조건은 ISRM 기준에 준하였다.

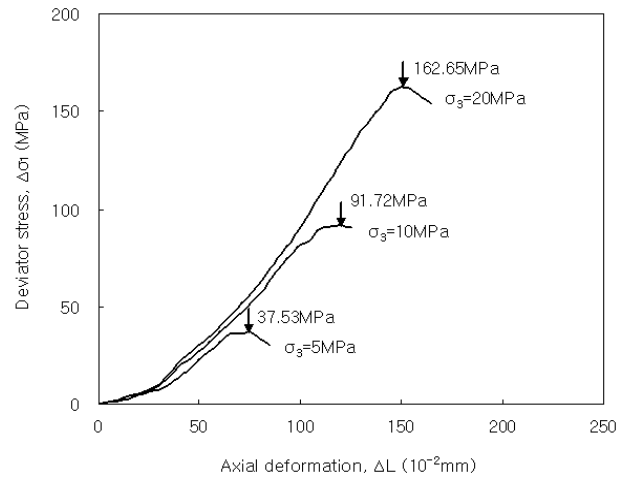
#### 4. 시험결과 및 고찰

##### 4.1 응력-변형률 곡선

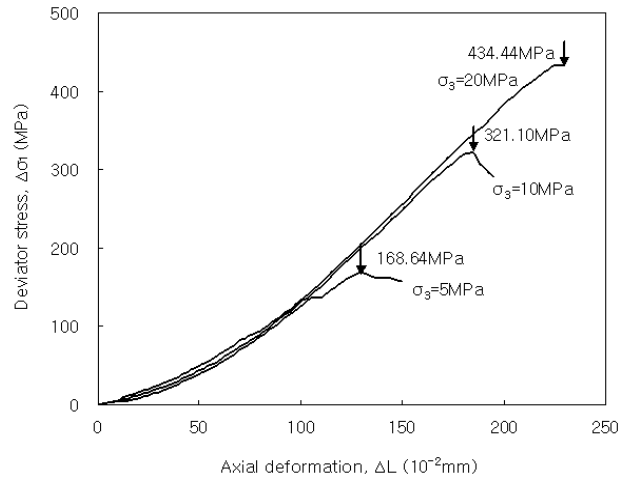
제주도 현무암에 대한 강도정수를 산정하기 위하여 삼축압축시험을 실시하였다. 삼축압축시험에서는 암석시료에 먼저 구속압을 가한 후 축방향으로 압축력을 가하여 파괴가 발생할 때까지 하중과 변형량을 측정하였다. 이때 구속압은 5MPa, 10MPa 및 20MPa를 가하였다.

그림 4는 제주도 현무암에 대한 삼축압축시험에 대한 결과를 나타낸 것으로 횡축에는 축변형량을 도시하고 종축에는 축차응력을 도시하였다. 그림 4(a)은 표선리 현무암에 대한 삼축압축시험결과를 나타낸 것으로 하중이 증가함에 따라 변형량이 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 최대축차응력은 구속압이 5MPa일 경우 37.53MPa, 구속압이 10MPa일 경우 91.72MPa 그리고 구속압이 20MPa일 경우 162.65MPa인 것으로 나타났다. 그림 4(b)는 최대축에 대한 삼축압축시험결과를 나타낸 것으로 역시 하중이 증가함에 따라 변형량이 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 최대축차응력은 구속압이 5MPa일 경우 168.64MPa, 구속압이 10MPa일 경우 321.10MPa 그리고 구속압이 20MPa일 경우 434.44MPa인 것으로 나타났다. 그림 4(c)는 은 구속압이 5MPa일 경우결과를 나타낸 것으로 하중이 증가함에 따라 변형량이 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 최대축차응력은 구속압이 5MPa일 경우 23.14MPa, 구속압이 10MPa일 경우 47.93MPa 그리고 구속압이 20MPa일 경우 69.96MPa인 것으로 나타났다.

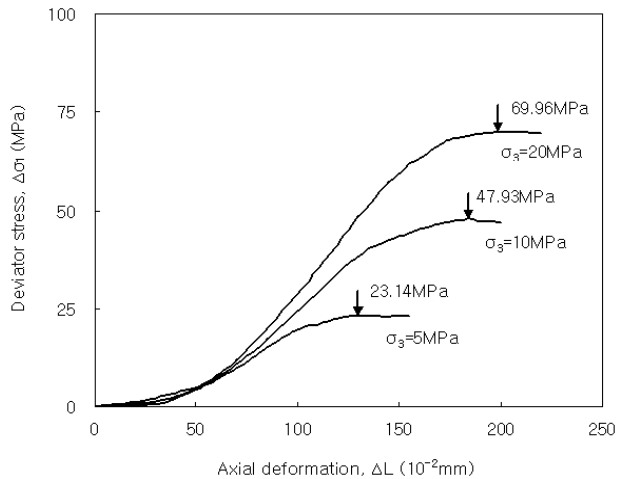
한편 압열인장강도시험(Brazilian test)을 실시하여 인장응력을 측정하였다. 측정결과 인장응력은 표선리 현무암의 경우 -2.78MPa이고, 조면암질현무암의 경우 -7.28MPa



(a) 표선리 현무암



(b) 조면암질 현무암



(c) 스코리아

그림 4. 암석종류별 응력-변형 곡선

이며, 스코리아의 경우 -1.33MPa인 것으로 나타났다.

따라서 삼축압축시험에 의한 최대축차응력 및 압열인장시험에 의한 최대인장응력은 조면암질 현무암이 가장 크고, 그 다음으로 표선리 현무암이 크며, 스코리아가 가

장 작은 것으로 나타났다.

## 4.2 Lade의 파괴규준

본 연구에서 적용하는 등방 단일경화 구성모델은 모래, 점토, 콘크리트, 암 등과 같은 마찰물질에 적용 가능하도록 Kim and Lade(1988)에 의해 제안된 구성모델이다. 이 모델은 단일경화시 하나의 항복면을 가진다는 것과 소성 포텐셜면을 구분하는 소위 비관련 흐름법칙을 사용하는 것이 특징이다.

어떤 물체에 하중이 작용하여 변형이 발생하면 시간에 의한 영향을 고려하지 않는 경우, 일반적으로 이 변형량을 탄성변형과 소성변형의 두가지로 분류하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$de_{ij} = de_{ij}^e + de_{ij}^p \quad (1)$$

식 (1)에서 탄성거동은 Hooke의 법칙을 따른다.

한편, 소성거동은 비관련 흐름법칙과 단일경화에 따른 항복규준 등으로 분류하여 응력불변량의 항으로 나타낸다. 여기서 응력불변량이란 제1응력불변량( $I_1$ ), 제2응력불변량( $I_2$ ) 및 제3응력불변량( $I_3$ )으로 구분하며 각각 식 (2)에서 식 (4)와 같다.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2)$$

$$I_2 = -(\sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_3 \cdot \sigma_1) \\ = \tau_{xy} \cdot \tau_{yx} + \tau_{yz} \cdot \tau_{zy} + \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} \\ - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) \quad (3)$$

$$I_3 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 \\ = \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} + \tau_{yx} \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{xz} \\ - (\sigma_x \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{xy} + \sigma_y \cdot \tau_{zx} \cdot \tau_{xz} + \sigma_z \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yx}) \quad (4)$$

Lade(1977)는 마찰물질에 대한 재료의 3차원 파괴규준은 곡선 형태의 파괴포락선을 가진다고 하였다. 이 파괴규준을 콘크리트나 암의 파괴규준으로 활용시킬 수 있도록 확장시킨바 있다(Lade, 1982; Kim and Lade, 1988). Lade (1977)는 흙의 파괴규준을 제1 응력불변량과 제3 응력불변량의 항으로 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$\left( \frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left( \frac{P_a}{I_1} \right)^m = \eta_1 \quad (5)$$

여기서,  $\eta_1$ 과  $m$ 은 재료에 따라 결정되는 토질 매개변수이다.

위 식으로부터 얻어지는 파괴면은 주응력 공간상에서 응력축의 원점에서 정점을 가지는 비대칭 탄알모양이며, 정점에서의 각도는 삼축압축시험에 의해 결정되고,  $\eta_1$ 의 값에 따라 증가한다.

식 (5)에 의해 제시된 파괴규준은 양면대수지에 파괴시의  $\left( \frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right)$ 과  $\left( \frac{P_a}{I_1} \right)$ 의 관계를 각각 종축과 횡축의 값으로 도시함으로써 구할 수 있다. 이처럼 삼축압축시험의 결과치를 회귀분석하여 구한 절편과 기울기가 각각  $\eta_1$ 와  $m$ 이다.

암의 경우도 흙과 같이 마찰재료이기 때문에 위 식과 유사한 파괴규준의 형태로 표현할 수 있을 것이다. 다만 암의 경우는 점착력과 인장강도를 가질 수 있기 때문에 이 부분에 고려가 필요하다. 따라서, 주응력 공간을 그림 5에 도시된 바와 같이 정수압축을 따라 음의 방향으로 이동시켜 조정하여야 한다. 이때 수직응력  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 에 그림 5의 일정응력  $aP_a$ 만큼을 더하여 파괴규준식에 대입하여야 한다.

$$\bar{\sigma}_x = \sigma_x + aP_a \quad (6a)$$

$$\bar{\sigma}_y = \sigma_y + aP_a \quad (6b)$$

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_z + aP_a \quad (6c)$$

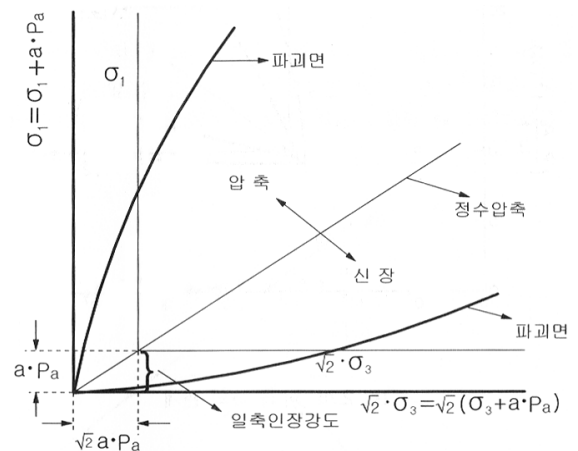
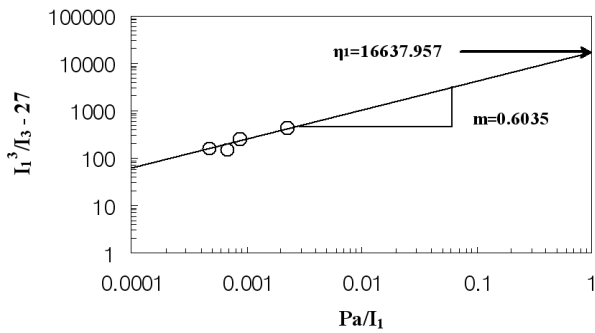
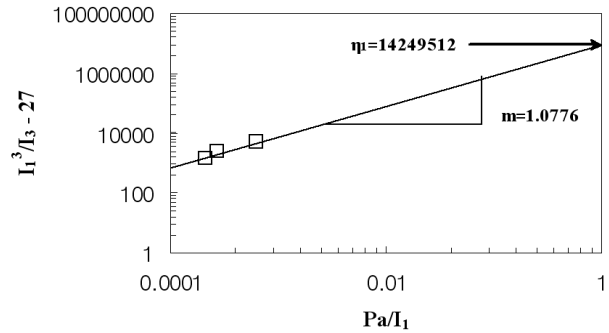


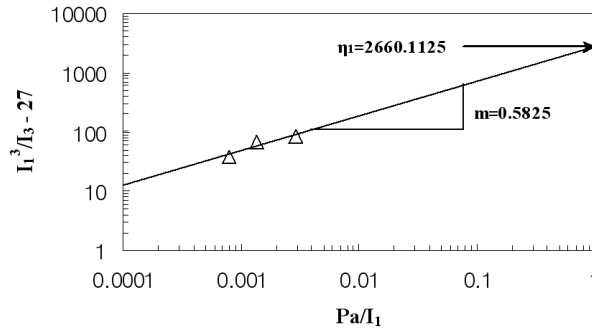
그림 5. Lade의 파괴규준(홍원표, 1999)



(a) 표선리 현무암



(b) 조면암질 현무암



(c) 스킨리아

그림 6. 파괴규준의 매개변수인  $\eta_1$ 와  $m$ 의 선정

여기서  $a$ 는 무차원 정수이며  $aP_a$ 는 암의 인장강도효과를 반영하게 된다.

세 정수  $m$ ,  $\eta_1$  및  $a$ 의 크기에 따라 파괴면의 형상이 달라지나 이들은 서로 상호작용을 한다. 예를 들면 암의 일축압축강도 계산시에 서로 상호영향을 미친다. 따라서 몇몇 경위의  $m$ ,  $\eta_1$  및  $a$ 의 조합은 동일한 일축압축강도로 구하여 질 수 있다.

실험 데이터로 이들 세 정수를 구하기 위하여는 먼저  $a$ 값을 설정한 후  $aP_a$ 를 수직응력에 더한 후 식 (5)에 대입한다. 그런 후  $\eta_1$ 과  $m$ 을  $(I_1^3/I_3 - 27)$ 과  $(P_a/I_1)$ 관계를 양면대수지상에서 구한다.  $a$ 를 다시 변경하여 동일 작업을 반복 실시하여 다른 조합의  $\eta_1$ 과  $m$ 을 구한다. 이때  $a$ 값의 설정을 원활히 하기 위하여  $aP_a$ 를 그림 5에서 보는 바와 같이 암의 일축압축강도보다 약간 크다는 사실을 참조할 필요가 있다.

그림 6은 식 (4)에서와 같이 Lade(1977)의 3차원 파괴규준에 의한 응력 제1불변량과 제3불변량의 비를 나타낸 것으로 양면대수지에 파괴시의  $(I_1^3/I_3 - 27)$ 과  $(P_a/I_1)$ 관계를 각각 종축과 횡축에 도시함으로써 계수인  $\eta_1$  및  $m$ 을 구한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 표선리 현무암의 경우  $\eta_1 = 16637.957$ ,  $m = 0.6035$ , 조면암질 현무암의 경우  $\eta_1 = 14249512$ ,  $m = 1.0776$ , 그리고 스킨리아의 경우

$\eta_1 = 2660.1125$ ,  $m = 0.5825$ 인 것으로 나타났다.

그림 6을 통하여 결정된 Lade의 파괴규준을 이용하여 주응력공간상의 파괴면을 Triaxial plane과 정팔면체 평면에 도시할 수 있다. 그림 7은 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스킨리아의 주응력공간상의 파괴면을 Triaxial plane에 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 파괴면은 응력축의 원점에서 정수압축을 따라 음의 방향으로 이동된 정점을 가지는 비대칭 총알모형이다. 정점에서의 각도는  $\eta_1$ 의 값에 따라 증가한다. 또한, 이 파괴면은 정수압축에 대하여 볼록한 형태를 가지며 곡률은  $m$ 값에 따라 증가한다. 한편, 파괴시의  $\sigma_1$ 과  $\sigma_3$ 를 함께 도시한 결과 Triaxial plane과 유사하게 일치하는 것으로 나타났다.

## 5. 3차원 파괴규준에 대한 분석

### 5.1 암종별 3차원 파괴면 분석

그림 8은 제1응력불변량( $I_1$ )이 100MPa일 경우 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스킨리아의 주응력공간상의 파괴면을 3차원의 정팔면체 평면에 도시한 것이다. 정팔면체 평면에서  $\eta_1$ 이 증가할수록 파괴면의 단면형상은 원형에서 부드럽고 매끄러운 모서리를 가지는 삼각형으로

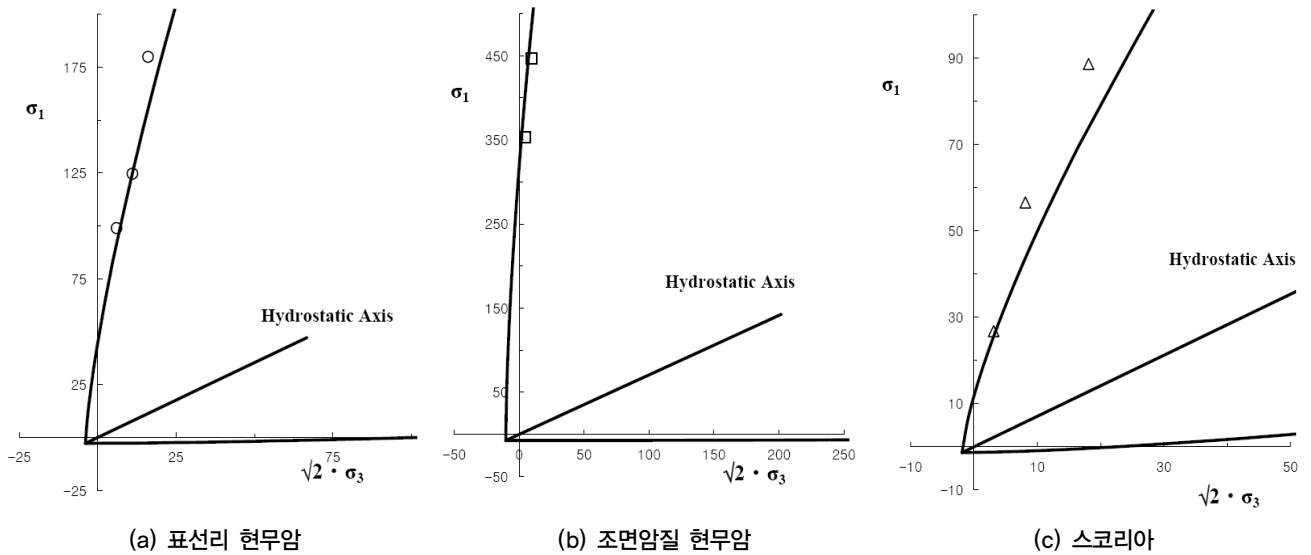


그림 7. Lade 파괴규준의 삼축면

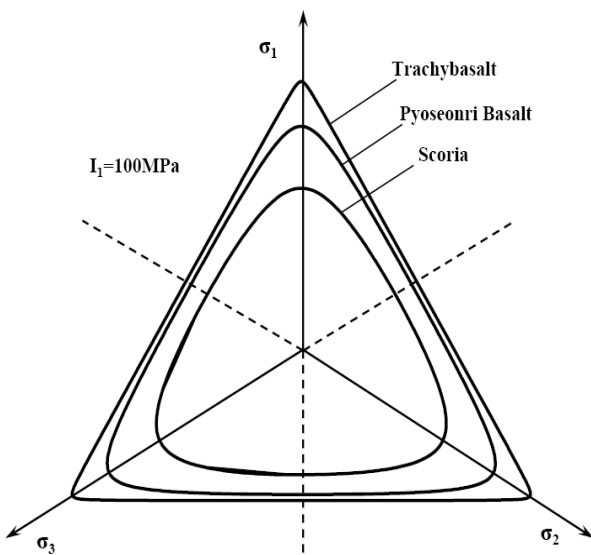


그림 8. Lade 파괴규준의 정팔면체 평면

변한다.  $m > 0$ 인 경우에는 파괴면의 단면형상은  $I_1$ 의 값이 증가함에 따라 삼각형에서 원형으로 변하게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 정팔면체 평면은 조면암질 현무암이 가장 크고 스킨리아가 가장 작은 것으로 나타났다. 그리고 단면형상은 조면암질 현무암이 가장 삼각형에 가깝고 스킨리아가 가장 원형에 가까운 것으로 나타났다.

## 5.2 Lade의 파괴규준과 Mohr-Coulomb의 파괴규준 비교

그림 9는 Lade의 3차원 파괴규준과 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 비교하기 위하여 표선리 현무암, 조면암질 현

무암 및 스킨리아의 주응력공간상 파괴면을 3차원의 정팔면체 평면에 도시하였다. 그리고 삼축압축시험결과도 함께 도시하였다. 그림 9(a)는 표선리 현무암에 대한 Lade의 3차원 파괴규준과 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 시험결과와 함께 3차원 정팔면체 평면에 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Lade의 3차원 파괴규준이 Mohr-Coulomb의 파괴규준보다 항복면이 더 큰 것으로 나타났으며, 시험결과는 두 파괴규준 사이에 위치하는 것으로 나타났다. 그림 9(b) 및 그림 9(c)는 각각 조면암질 현무암과 스킨리아에 대한 Lade의 3차원 파괴규준과 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 시험결과와 함께 3차원 정팔면체 평면에 도시한 것이다. 조면암질 현무암의 경우 Lade의 3차원 파괴규준이 Mohr-Coulomb의 파괴규준보다 항복면이 더 크지만 차이가 작은 것으로 나타났다. 그러나 스킨리아의 경우 두 파괴규준에 대한 차이가 큰 것으로 나타났다. 그리고 전체적으로 높은 응력하에서는 Lade의 파괴규준이 실험치와 일치하며, 낮은 응력하에서는 Mohr-Coulomb의 파괴규준이 실험치와 일치하는 것으로 나타났다.

한편, Lade의 파괴규준을 이용하여 표선리 현무암, 조면암질 현무암 및 스킨리아에 대한 강도정수를 산정하였다. 그리고 이 강도정수를 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 이용하여 산정된 강도정수와 비교검토 하였다. 표 1은 두 파괴규준을 적용하여 구한 강도정수를 비교한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 Lade의 파괴규준으로 구한 강도정수가 Mohr-Coulomb의 파괴규준으로 구한 강도정수보다 더 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 파괴규준에 따라 다른 강

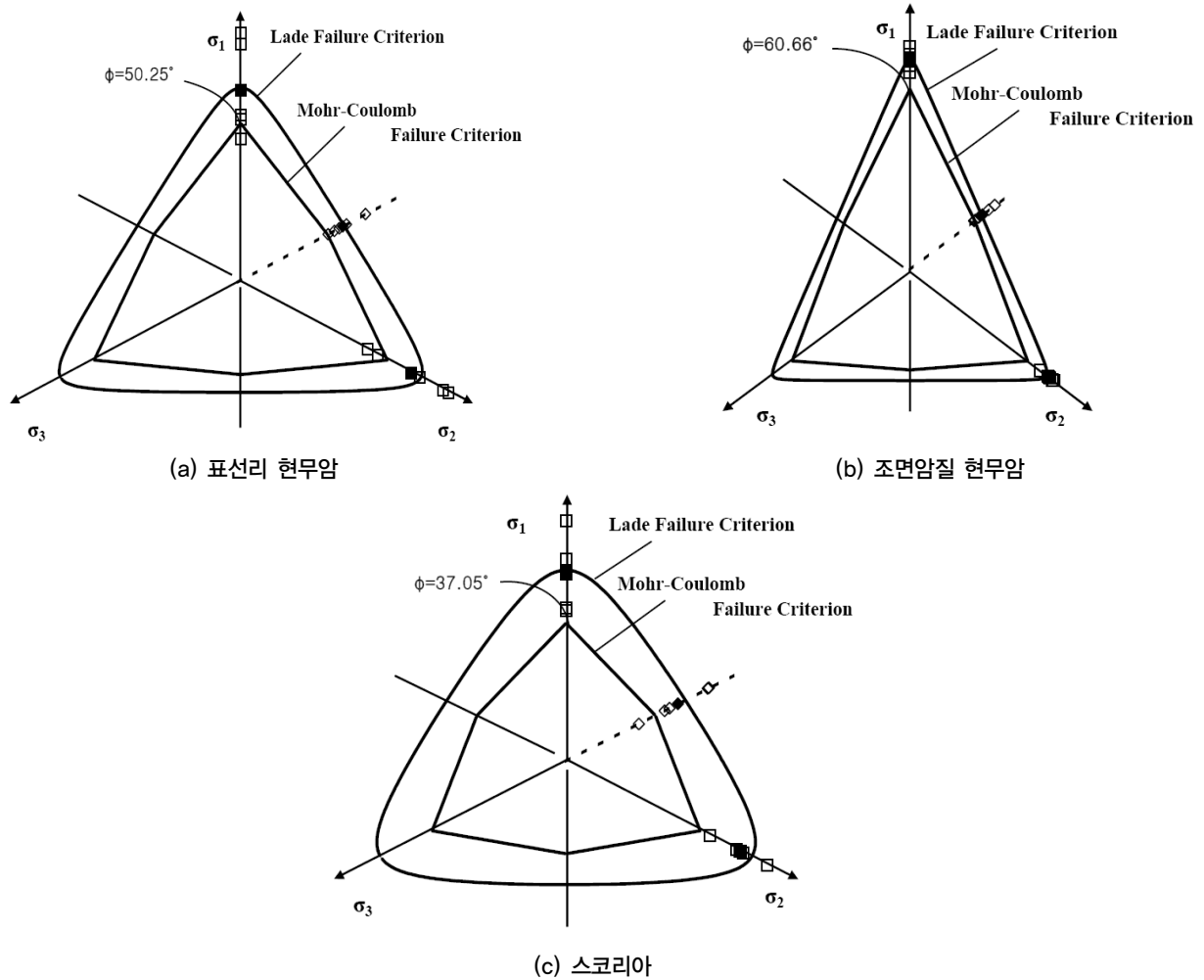


그림 9. 정팔면체 평면상에서 Lade 파괴기준과 Mohr-Coulomb 파괴기준의 비교

표 1. Lade 파괴기준과 Mohr-Coulomb 파괴기준으로부터 구한 강도정수

암종	Lade 파괴기준		Mohr-Coulomb 파괴기준	
	c	$\phi$	c	$\phi$
표선리 현무암	5.57MPa	53.14°	5.35MPa	50.25°
조면암질 현무암	28.11MPa	65.88°	16.99MPa	60.66°
스크리아	2.82MPa	39.40°	2.33MPa	37.05°

도정수가 산정되므로, 암반의 파괴기준 선정시 신중한 결정이 필요할 것으로 판단된다.

## 6. 결론 및 요약

본 연구에서는 제주도 현무암에 대한 일련의 삼축압축 시험을 실시하여 암석의 3차원 파괴기준을 적용하였다. 삼축압축시험 결과를 토대로 Lade(1977)의 3차원 파괴기준을 적용하여 강도정수를 산정하였으며, Mohr-Coulomb의 파괴기준으로 산정한 강도정수와 비교분석하였다. 이

들 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) Lade(1977)의 3차원 파괴기준을 이용하여 파괴시의  $(I_1^3/I_3 - 27)$ 과  $(P_a/I_1)$ 관계로부터 토질매개 변수인  $\eta_1$  및  $m$ 을 구할 수 있으며, 표선리 현무암의 경우  $\eta_1 = 16637.957$ ,  $m = 0.6035$ , 조면암질 현무암의 경우  $\eta_1 = 14249512$ ,  $m = 1.0776$ , 그리고 스크리아의 경우  $\eta_1 = 2660.1125$ ,  $m = 0.5825$ 로 나타났다.
- (2) 주응력공간상 3차원 파괴면을 나타내는 정팔면체 평면에서 조면암질 현무암의 파괴면이 가장 크고



스코리아가 가장 작은 것으로 나타났다. 그리고 단면형상은 조면압질 현무암이 가장 삼각형에 가깝고 스코리아가 가장 원형에 가까운 것으로 나타났다.

- (3) 정팔면체 평면에서 삼축실험결과와 Lade의 파괴포락선 및 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 비교한 결과 높은 응력하에서는 Lade의 파괴규준이 실험치와 일치하며, 낮은 응력하에서는 Mohr-Coulomb의 파괴규준이 실험치와 일치하는 것으로 나타났다.
- (4) 정팔면체 평면에서 Lade의 3차원 파괴면은 Mohr-Coulomb의 3차원 파괴면보다 크게 산정됨을 알 수 있으며, 이는 Lade의 파괴규준으로 산정된 강도정수가 Mohr-Coulomb의 파괴규준으로 구한 것 보다 더 크게 산정됨을 의미한다.

## 참고문헌

1. 남정만, 윤중만, 송영석, 김준호 (2008a), “제주도 현무암의 공학적 특성 분석”, *한국토목섬유학회논문집*, 제7권, 제1호, pp.13-22.
2. 남정만, 윤중만, 송영석, 김준호 (2008b), “제주도 현무암의 압축 및 인장강도에 대한 영향요인 분석”, *지질공학*, 제18권, 제2호, pp.215-225.
3. 엄관용 (2002), *제주도 화산암의 역학적 특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 연세대학교.
4. 홍원표 (1999), *기초공학특론 (I) 얇은기초*, 중앙대학교 출판부, 서울, pp.117-135.
5. Kim, M.K. and Lade, P.V. (1988), “Single hardening constitutive model for frictional materials I : Plastic potential function”, *Computers and Geotechnics*, Vol.5, pp.307-324.
6. Lade, P.V. (1977), “Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface”, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.13, pp.1019-1035.
7. Lade, P.V. (1982), “Three parameter failure criterion for concrete”, *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.108, No.5, pp.850-863.

(논문접수일 2010. 8. 11, 심사완료일 2010. 9. 6)